

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4\(42\)-485-500](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4(42)-485-500)

УДК 691.55:519.233

Андрій Валерійович Колесников¹, Дмитро Валерійович Левицький²¹доктор технічних наук, доцент кафедри хімії та екології

Одеська державна академія будівництва та архітектури (Одеса, Україна)

E-mail: kolesnikov_himek@odaba.edu.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8737-0933>

ResearcherID: IRZ-3809-2023

²аспірант кафедри хімії та екології

Одеська державна академія будівництва та архітектури (Одеса, Україна)

E-mail: 924ldv@odaba.edu.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5350-522X>

ДОСЛІДЖЕННЯ І ОПТИМІЗАЦІЯ СКЛАДІВ РЕСТАВРАЦІЙНИХ КОМПОЗИТИВ ДЛЯ БУДІВЕЛЬ ІЗ ВАПНЯКУ-ЧЕРЕПАШНИКУ

У статті наведено результати комплексного дослідження та оптимізації складів штукатурно-реставраційних композитів, призначених для ремонту та збереження будівель і споруд з вапняку-черепашнику. Досліджено композиційні матеріали на основі повітряного вапна з додаванням портландцементу, глини та комбінованого наповнювача з кварцового піску й подрібненого черепашнику. Отримано експериментально-статистичні моделі адгезійної міцності до пористої та гладкої основи, паропроникності, водопоглинання та міцності на стиск. Показано, що структурна сумісність реставраційного матеріалу та основи досягається лише за збалансованого співвідношення ущільнення мінеральної матриці та розвитку відкритої порової мережі. На основі методу функції бажаності виконано багатокритеріальну оптимізацію рецептури композиту для різних умов експлуатації, що дозволило визначити компромісні склади, які придатні для реставрації історичних будівель з черепашнику.

Ключові слова: вапняк-черепашник; реставраційні композити; адгезія; паропроникність; водонасичення; експериментально-статистичне моделювання; багатокритеріальна оптимізація.

Рис.: 7. Табл.: 7. Бібл.: 17.

Актуальність теми дослідження. Історичні будівлі, зведені з вапняку-черепашнику, складають значну частину архітектурної спадщини півдня України, насамперед Одеси, де цей природний камінь використовувався при будівництві житлових будинків, громадських споруд, особняків і пам'яток архітектури XIX – початку XX століття. Вапняк-черепашник являє собою осадову карбонатну породу, що відрізняється малою щільністю, складною багатомасштабною пористою структурою – від макропор розміром близько міліметрів до мікрокапілярів і нанопор, де розвиваються тонкі механізми накопичення вологи та перенесення розчинених солей, і як наслідок, високим водопоглинанням і здатністю до природної регуляції вологообміну. Такі властивості визначають його довговічність в умовах сухого та помірно вологого клімату, але водночас роблять цей природний камінь чутливим до циклів зволоження та висихання, біокорозії і локальних змін мікроклімату. З часом історичні будівлі з черепашнику потребують реставрації, відновлення та збереження, при цьому одним з основних етапів є вибір реставраційних композиційних матеріалів з урахуванням не тільки механічних вимог, але і сумісності з природною капілярною системою каменю основи. Таким чином, дослідження та підбір оптимального складу будівельних розчинів для реставрації будівель та споруд з вапняку-черепашнику для забезпечення структурної сумісності, рівноважного вологообміну й адекватних механічних характеристик при мінімальному ризику деградації контактної зони є актуальним завданням.

Постановка проблеми. Сучасна реставраційна практика показує, що універсальні цементні або полімерні склади часто виявляються несумісними з пористими карбонатними породами: підвищена щільність, низьке водопоглинання, низька паропроникність і високий модуль пружності призводять до формування градієнтів вологості, концентрації напружень у зоні контакту і подальшого відшарування або руйнування прилеглого шару каменю. Тому дедалі більшого поширення набуває використання вапняних і змішаних вапняно-мінеральних композитів, які традиційно застосовувалися для захисту та оздоблення будівель з черепашнику. Такі матеріали мають характеристики, близькі до природ-

ного пористого каменю: високу паропроникність, помірну міцність, а також пластичність, що дозволяє формувати стійку контактну зону без надмірних напружень. На наш погляд, використання композитів на основі вапна (з додаванням до в'язучого компоненту цементу і глини) та комплексного наповнювача (суміші кварцового піску та меленого черепашнику) як штукатурних розчинів є доцільним для забезпечення високого рівня сумісності з каменем-основою.

Формування структури вапняно-цементно-глинистих композитів і багатофазної системи «реставраційний композит – межа розділу – вапняк-черепашник» є складним фізико-хімічним процесом, що включає гідратацію цементних фаз, карбонізацію вапна, поведінку глинистої складової, перерозподіл вологи та поступове ущільнення порового простору. Структура, що формується на ранніх стадіях, визначає мікромеханічні параметри матеріалів у системі «камінь – розчин», включаючи адгезію, здатність контактного шару проникати в пори основи, стійкість до вологообміну та довговічність. Тому підбор складу реставраційних композитів треба проводити відповідно до зазначених умов структуроутворення із застосуванням комплексного експериментального та аналітичного підходу, який включає аналіз структури вихідного каменю, дослідження параметрів водопоглинання та паропроникності, визначення адгезійної міцності й побудову регресійних моделей для їх подальшої оптимізації

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Сучасні дослідження в області реставрації будівель, особливо об'єктів культурної спадщини, з пористих карбонатних порід підкреслюють необхідність суворої матеріалосумісності між вихідним каменем і ремонтним складом [1]. Під матеріалосумісністю розуміють узгодження фізичних, гігроскопічних, механічних і структурних характеристик матеріалів, включаючи розподіл пор, водопоглинання, капілярний перенос, паропроникність і деформаційні властивості. Аналіз публікацій показує, що саме неузгодженість за цими ознаками стає причиною накопичення вологи, утворення зон кристалізації солей, виникнення локальних напружень і подальшого руйнування реставраційного шару або контактної зони [1–3].

Реставраційні розчини на основі вапна при виконанні робіт з відновлення будівель та споруд з вапняку-черепашнику мають високий ступінь сумісності та необхідні експлуатаційні властивості [2]. В оглядових дослідженнях RILEM зазначається, що вапняні композити мають унікальну здатність до «дихання» та природної регуляції вологи, і тому історично були основними ремонтними розчинами для пористих карбонатних каменів [3]. Найважливіша особливість таких систем – багатостадійний процес структуроутворення, що включає гідратацію мінеральних фаз, карбонізацію, сорбційні процеси та поступове ущільнення порового простору. Однак чисте повітряне вапно характеризується обмеженою ранньою міцністю, що стимулює застосування комбінованих вапняно-пуцоланових систем [4; 5].

Досвід застосування різних видів в'язучих та домішок показує, що якісний та кількісний склад реставраційного матеріалу істотно впливає на капілярну структуру, міцність і довговічність як вихідного композиту, так і системи «розчин – основа» загалом [2; 1; 6]. Використання різноманітних домішок, наприклад, тонкої пемзи, вулканічної золи, метакаоліну, здатне покращувати структуру композиційної матриці та контролювати динаміку карбонізації, водночас забезпечуючи збереження високої паропроникності, щоб не порушити природний вологообмін каменю [4–7].

Експериментальні дослідження з водопоглинання та висихання показують, що структура пор розчину принципово визначає напрямок і швидкість вологообміну [9; 10].

Критично важливим параметром сумісності є поведінка системи в умовах змінного зволоження. Роботи з вимірювання капілярного водопоглинання у відомих розрізах природних каменів виявляють значну варіативність у швидкості насичення, що вимагає адаптації рецептури розчину під конкретний камінь [11].

Не менш важливим аспектом є поведінка матеріалу в контактних зонах, наприклад для мурувальних швів. Дослідження таких контактних зон підтверджують, що правильний підбір складу вапняного шва впливає на швидкість висихання всієї кладки, запобігає накопиченню вологи та знижує деградаційні процеси [10]. Аналогічні результати отримані в роботах, присвячених аналізу властивостей різних вапняних розчинів, де підкреслюється необхідність тонкого підбору рецептури для досягнення довготривалої стійкості [8; 13].

Аналіз сучасних публікацій також показує зростання інтересу до використання глинистих і керамічних домішок у вапняно-цементних і вапняних системах. Вони позитивно впливають на розподіл вологи, формування мікроструктури й довговічність, що особливо важливо при реставрації сильно пористих порід [12]. При цьому вплив таких домішок на паропроникність і капілярний перенос повинен ретельно контролюватися, щоб уникнути блокування вологи в пористій основі [4–7].

Важливу роль у виборі складу відіграють також методи математичного моделювання властивостей. Їх застосування дозволяє системно враховувати нелінійні ефекти компонентів складу та підбирати багатокритеріальні оптимальні рецептури за міцністю, паропроникністю, капілярною активністю і довговічністю [13; 14; 15].

Таким чином, успішне застосування реставраційних композитів для пористих карбонатних порід вимагає комплексного врахування механізмів вологообміну, порової архітектури, динаміки карбонізації та адгезії. Найбільш перспективними є вапняні та вапняно-пуцоланові розчини з легким наповнювачем або домішками, які забезпечують структурну сумісність з каменем і високу паропроникність.

Метою дослідження є розробка науково обґрунтованого оптимального складу реставраційного композиту для ремонту та відновлення будівель та споруд з вапняку-черепашнику. Для досягнення цієї мети були проведені: попередні дослідження співвідношень «склад – структура – властивості» штукатурно-реставраційних композитів на основі вапна, цементу, глини та комбінованого наповнювача; планування експерименту та його реалізація (отримання результатів вимірювання експлуатаційних властивостей складів, таких як адгезійна міцність, паропроникність, міцність на стиск, водопоглинання); побудова математичних моделей типу «склад – властивість» та аналіз впливу компонентів на експлуатаційні параметри композиту; проведення оптимізації складів з використанням методів експериментально-статистичного моделювання.

Як **об'єкт дослідження** використано зразки природного вапняку-черепашнику з типовою пористою структурою, а також реставраційний композиційний матеріал, що містить повітряне вапно, портландцемент, глинисту домішку (каолінова глина), кварцовий пісок і подрібнений черепашник як структурно сумісний наповнювач. Такий вибір компонентів дозволяє моделювати властивості композитів, близьких за капілярною активністю, паропроникністю і гігроскопічністю до вихідного каменю.

15-точковий центральнокомпозиційний план експерименту скороченого типу розроблений із застосуванням методів планування експерименту другого порядку, що дозволяють описати нелінійні зв'язки між варіювальними компонентами. Як фактор обрано масові частки основних складових реставраційного композиту, які наведені в табл. 1.

Для різних складів згідно з планом експерименту визначалися адгезія до черепашнику як основного пористого субстрату, адгезія до гладкої кераміки для контролю змін зчеплення за умови домінування фізико-хімічних механізмів, водопоглинання в капілярному режимі, паропроникність композиту, основи і двошарової системи «черепашник – реставраційний склад», міцність на стиск.

Таблиця 1 – Фактори планованого експерименту та рівні їхнього варіювання

№	Фактори	Значення, %		Кодовані значення	
		Min	Max	Min	Max
1	2	3	4	5	6
X ₁	Частина цементу в загальній суміші в'язучих	5 %	15 %	-1	1
X ₂	Частина глини в загальній суміші в'язучих	5 %	10 %	-1	1
X ₃	Вміст черепашнику в комбінованому наповнювачі	0 %	75 %	-1	1

Джерело: розроблено авторами.

Вибір методів дослідження обумовлений необхідністю комплексного порівняння гігроскопічних властивостей матеріалів, перевірки структурної сумісності як за ключовими показниками вологообміну, так і структурно-механічними показниками.

Обробка даних виконувалася методами математичної статистики, прийнятими в задачах оптимізації складів будівельних матеріалів [14–16]. На основі отриманих регресійних експериментально-статистичних моделей формувалися поверхні та ізоповерхні відгуку для кожної властивості, що дозволило виділити області оптимальних поєднань факторів та оцінити вплив компонентів на ключові експлуатаційні параметри.

Виклад основного матеріалу. Результати досліджень являють собою комплекс модельних уявлень про структуру складної системи «черепашникова основа – межа розділу – реставраційно-штукатурний склад» і її трансформацію протягом всього життєвого циклу від формування через взаємоадаптацію в експлуатаційний період до руйнування.

Структура і властивості межі розділу «черепашник – реставраційний склад» у системах ремонту історичних кладок мають ключовий, найважливіший характер: саме у вузькій зоні контакту реалізується перехід від відкритої пористості природного карбонату до структури штучного композиту, і від характеру цього переходу істотно залежить довговічність ремонту. Для черепашнику, що має виражену багатомасштабну пористість (макропори порядку 0,1...1 мм, мезо- і мікрокапіляри порядку 1...1000 нм), межа повинна бути організована таким чином, щоб не створювати різкої відмінності за пористою архітектурою та проникністю пари й вологи. Ідеальна контактна зона частково «проростає» одна в одну: частинки наповнювача реставраційного складу (зокрема, подрібнений черепашник) проникають в поверхневі пори каменю, а дрібнодисперсна фракція матриці (цементно-вапняна і глиниста фази) заповнює капіляри, утворюючи градієнт пористості, який не створює різких бар'єрів вологообміну. У практичному сенсі це означає, що реставраційний склад повинен поєднувати три групи властивостей: здатність до механічного зчеплення з пористою основою (зернистість і шорсткість заповнювача), достатню рухливість і змочування (реологічні властивості, що забезпечуються домішкою глини), і збереження дифузної паропроникності (за рахунок використання вапна та подрібненого черепашнику).

У нашій роботі вибір компонентів ґрунтувався на наступних структурних принципах:

- вапно забезпечує високу паропроникність і тривалу карбонізаційну міцність, «дишаючі» властивості, а також є історично традиційним матеріалом для оздоблення будівель з вапняку-черепашнику;
- цемент (у помірних частках 5...15 %) є доцільним для забезпечення базової зв'язності та ранньої міцності, необхідної на практиці, але його вміст не повинен бути настільки високим, щоб перетворити контакт на жорстку «плашку», яка блокує пористу мережу;
- глина (5...10 %) виконує роль реологічного і капілярного регулятора: вона підвищує водоутримання, покращує penetрацію матриці в мікропори;
- подрібнений черепашник у складі комбінованого наповнювача, що забезпечує мінералогічну та механічну сумісність, грубе механічне зчеплення та зменшення контрасту за модулем пружності і пористістю між шаром і основою.

На наш погляд, розчин вищезазначеного складу формує градієнт від частково грубої, механічно міцної «каркасоутворюючої» зони до більш пористої і паропроникної матриці, що необхідно забезпечити для довговічності реставрації.

Враховуючи вищенаведені теоретичні прогнози впливу окремих факторів, був здійснений перехід від концептуальних до експериментально-статистичних моделей властивостей за факторами (X_1 , X_2 , X_3).

Адгезія до черепашника – параметр, який визначає безпосередній механічний і довготривалий зв'язок реставраційного шару з пористою основою. З теоретичного погляду адгезія складається з механічного компонента (проникнення частинок у поверхневі пори, механічне заклинювання), капілярно-реологічного компонента (здатність матриці проникати і затікати в пори при нанесенні) і фізико-хімічного компонента (змочування, утворення гідратних і карбонатних фаз, іонні взаємодії).

Модель адгезії до черепашнику та її графічне відображення представлено на рис. 1.

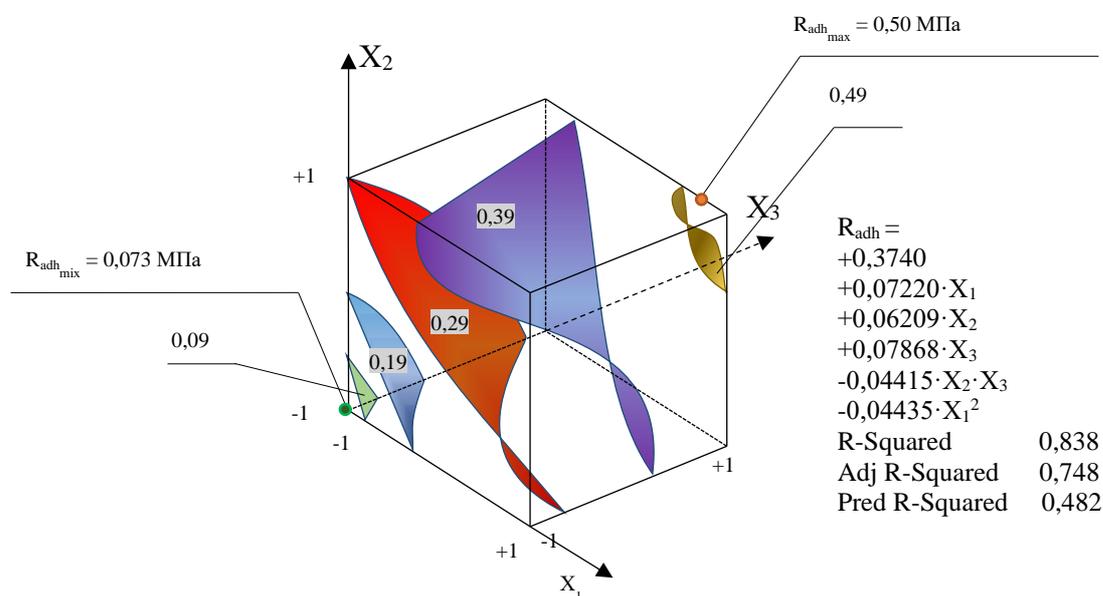


Рис. 1. Модель адгезії до черепашнику та її графічне відображення
Джерело: розроблено авторами.

Аналіз моделі адгезії реставраційного композиту до пористого черепашника показує, що ефективне зчеплення формується внаслідок поєднання механізмів структурної адаптації та фізико-хімічної взаємодії в контактній зоні. Підвищення адгезійної міцності пов'язане з розвитком проникнення матеріалу у відкриту порову систему основи та збільшенням площі реального контакту, що досягається за рахунок пористого карбонатного заповнювача й достатньої пластичності матриці. Водночас встановлено, що надмірне ущільнення структури або зростання жорсткості мінеральної фази знижує здатність композиції адаптуватися до мікрорельєфу черепашника, що проявляється у зменшенні адгезії. Таким чином, адгезія до пористої основи має виражений оптимальний характер і визначається балансом між проникністю, реологічною рухливістю та структурною жорсткістю контактної зони.

Модель для адгезії до плитки та її графічне відображення представлено на рис. 2.

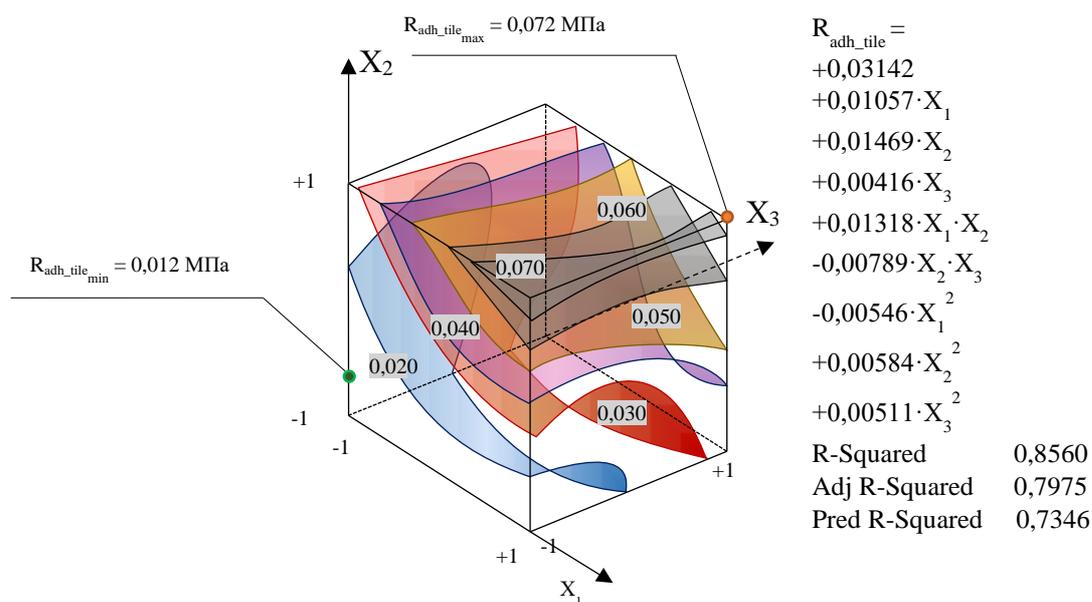


Рис.2. Модель адгезії до плитки та її графічне відображення

Джерело: розроблено авторами.

Модель адгезії до гладкої керамічної плитки демонструє принципово інший характер формування зчеплення, що підтверджує домінування фізико-хімічних механізмів взаємодії за відсутності механічного зачеплення. Зміни адгезійної міцності в цьому випадку пов'язані насамперед із хімічною активністю матриці, здатністю до змочування та формування стабільного міжфазного шару. Виявлена нелінійність свідчить про існування оптимального стану поверхневої активності та структурної щільності, за межами якого як надмірна пористість, так і надмірне ущільнення негативно впливають на адгезію. Порівняння двох моделей дозволяє розглядати адгезію до плитки як індикатор фізико-хімічної складової адгезії, а додатковий приріст адгезії до черепашника – як результат структурної адаптації до пористої основи.

Паропроникність – ключова характеристика, що визначає здатність шару «дихати». Теорія переносу вологи показує, що паропроникність залежить головним чином від обсягу відкритої пористості та зв'язності капілярної мережі. В наших дослідженнях визначення паропроникності проводилось на зразках, де на матеріал основу (зразки черепашника) наносили тонкий шар (5 мм) реставраційного розчину. Дослідження паропроникності саме такої системи дозволяє на наш погляд моделювати умови переносу пару на реальних об'єктах реставрації.

Модель паропроникності (рис. 3) показує, що дифузійні властивості композиту визначаються балансом між ущільненням матриці та розвитком відкритої порової мережі.

Підвищення паропроникності пов'язане з формуванням зв'язної системи відкритих капілярів, що забезпечується пористими карбонатними компонентами й обмеженою щільністю матриці. Водночас надмірне ущільнення структури, зокрема за рахунок зростання частки жорстких в'язучих, призводить до блокування дифузійних шляхів і зниження паропроникності. Таким чином, паропроникність проявляє оптимальний характер і виступає структурним обмеженням, що визначає верхню межу допустимого ущільнення композиту.

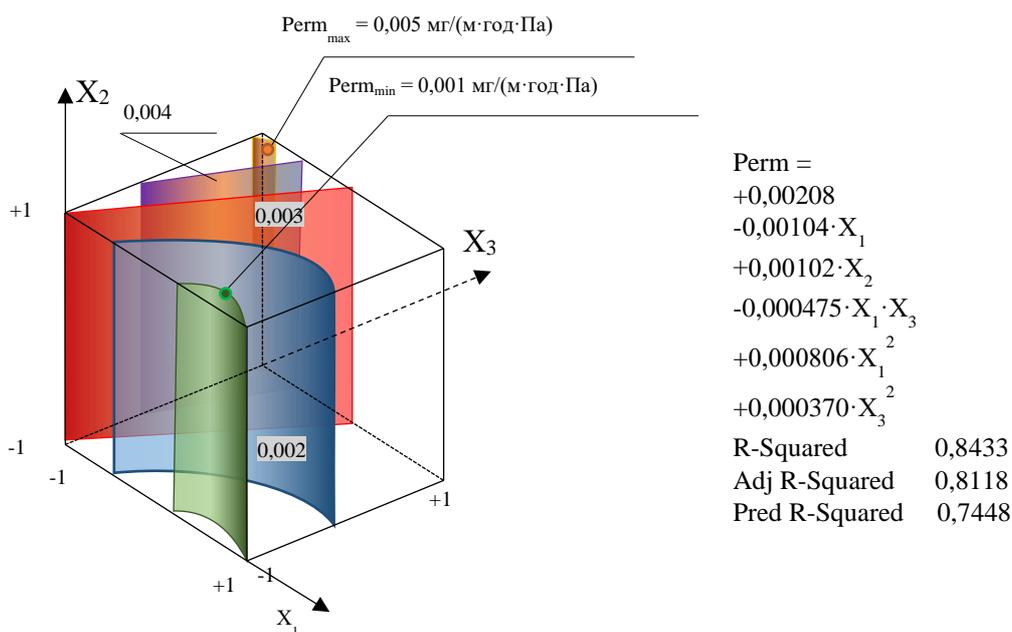


Рис. 3. Модель паропроникності та її графічне відображення

Джерело: розроблено авторами.

Рівень водонасичення визначає схильність системи до накопичення вологи та солей. Рівень водонасиченості досліджуваних зразків системи «композит – основа» визначали, моделюючи капілярне водопоглинання. Капілярне водопоглинання штукатурних розчинів – це процес всмоктування та переміщення води в пористій структурі затверділого розчину за рахунок капілярних сил, які виникають у порах малого діаметра. Цей показник характеризує здатність реставраційного штукатурного матеріалу втягувати вологу з навколишнього середовища (дощ, конденсат, ґрунтову або експлуатаційну вологу) та транспортувати її вглиб структури.

Модель водонасичення та її графічне відображення представлено на рис. 4.

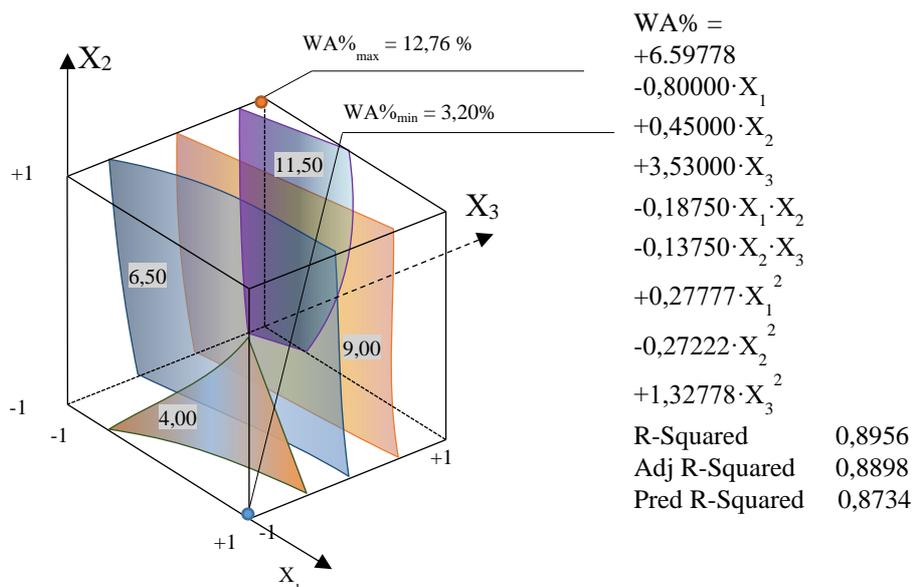


Рис. 4. Модель водонасичення та її графічне відображення

Джерело: розроблено авторами.

Модель водонасичення демонструє високу чутливість системи до розвитку капілярної пористості та наявності гідрофільних фаз. Зростання водопоглинання корелює з підвищенням частки відкритої порової структури та компонентів, здатних активно утримувати воду, що є типовим для систем з розвиненою багатомасштабною пористістю. Водночас встановлено, що певне ущільнення матриці дозволяє обмежити надмірне капілярне водопоглинання без повної втрати дифузійної здатності. Отже, водонасичення є показником структурної “ціни” за підвищену паропроникність та адгезійну адаптивність матеріалу.

Міцність на стиск – важливий експлуатаційний показник, що визначає граничні навантаження та стійкість до механічних впливів.

Модель міцності на стиск та її графічне відображення представлено на рис. 5.

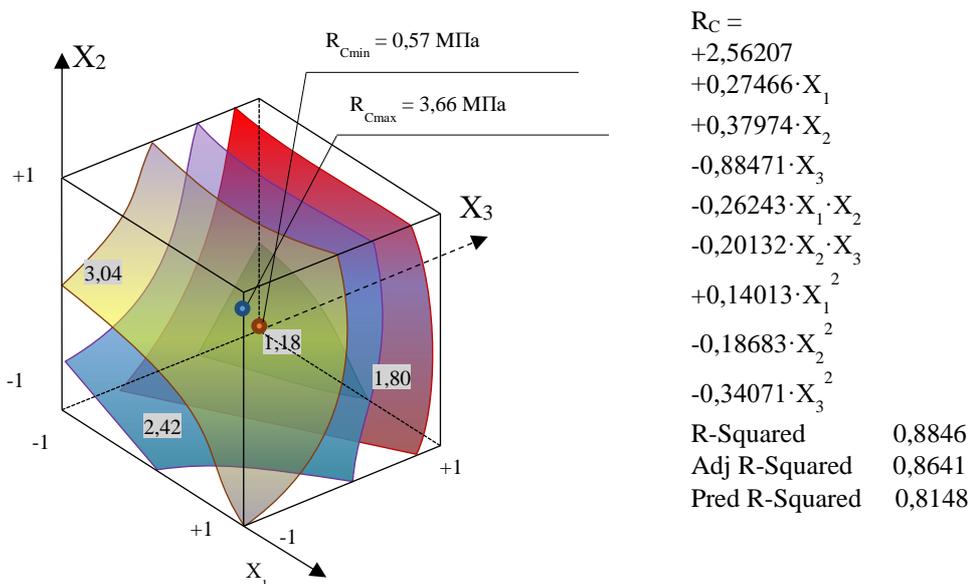


Рис. 5. Модель міцності на стиск та її графічне відображення

Джерело: розроблено авторами.

Модель міцності на стиск свідчить, що механічна працездатність композиту визначається ступенем формування зв’язної мінеральної матриці та ефективністю передачі навантажень між фазами. Підвищення міцності пов’язане з ущільненням структури та зростанням частки жорстких компонентів, однак встановлено, що надмірна жорсткість супроводжується зростанням структурної крихкості та втратою адаптивності до деформацій основи. Наявність нелінійних ефектів і антагонізму між окремими складовими свідчить про те, що максимальна міцність не є цільовою характеристикою для реставраційних матеріалів, сумісних з пористими карбонатними породами.

Порівняльний аналіз усіх моделей показує, що між адгезійними, дифузійними, гідрологічними та механічними властивостями існує певна неузгодженість. Компоненти та структурні рішення, що сприяють підвищенню адгезії і паропроникності, одночасно підвищують водонасичення і знижують міцність на стиск, тоді як засоби підвищення міцності обмежують дифузійні властивості та адаптивність контактної зони. Тому властивості композитів оптимальних складів не відповідають екстремальним значенням окремих показників, а формуються в області компромісу між взаємно конкуруючими вимогами. Побудовані регресійні моделі дозволяють кількісно описати цей компроміс і розглянути реставраційний композит як адаптивну матеріальну систему, властивості якої мають бути узгоджені насамперед зі структурними характеристиками основи.

Оптимізація рецептури реставраційних композитів для пористого черепашнику вимагає об'єднання якісних і кількісних підходів, що дозволяють як візуально виявити допустимі діапазони факторів, так і формально визначити компромісні рішення щодо кількох цільових властивостей. Первинним етапом служить побудова оверлейних карт, створених накладанням кількох областей прийнятності у факторному просторі. Для кожного відгуку моделі визначають область, в якій значення є допустимими відповідно до встановлених вимог, наприклад, мінімального рівня адгезії, обмеження водонасичення або нижній межі паропроникності. Кожна така область фактично є бінарною маскою, що містить точки, що задовольняють критерію, і точки, що не задовольняють йому. Оверлейна карта дозволяє швидко виявити, чи існує взагалі область факторних комбінацій, в якій матеріалосумісність досягається одночасно за декількома ключовими властивостями, і якщо так – визначити геометрію цієї області та її положення щодо досліджених рівнів факторів.

В роботі оверлейні карти будували, наприклад, у площині факторів X_1 та X_3 при фіксованому значенні X_2 , що дозволило наочно відобразити вплив частки цементу та частки подрібненого черепашника при різних рівнях вмісту глини. Надалі саме ця область є стартовою зоною для чисельної оптимізації, задає доцільні межі й дозволяє виключити області, які не задовольняють вимогам щодо водонасичення, адгезії або паропроникності.

Цільові значення властивостей, що були використані в оптимізації наведені в табл. 2.

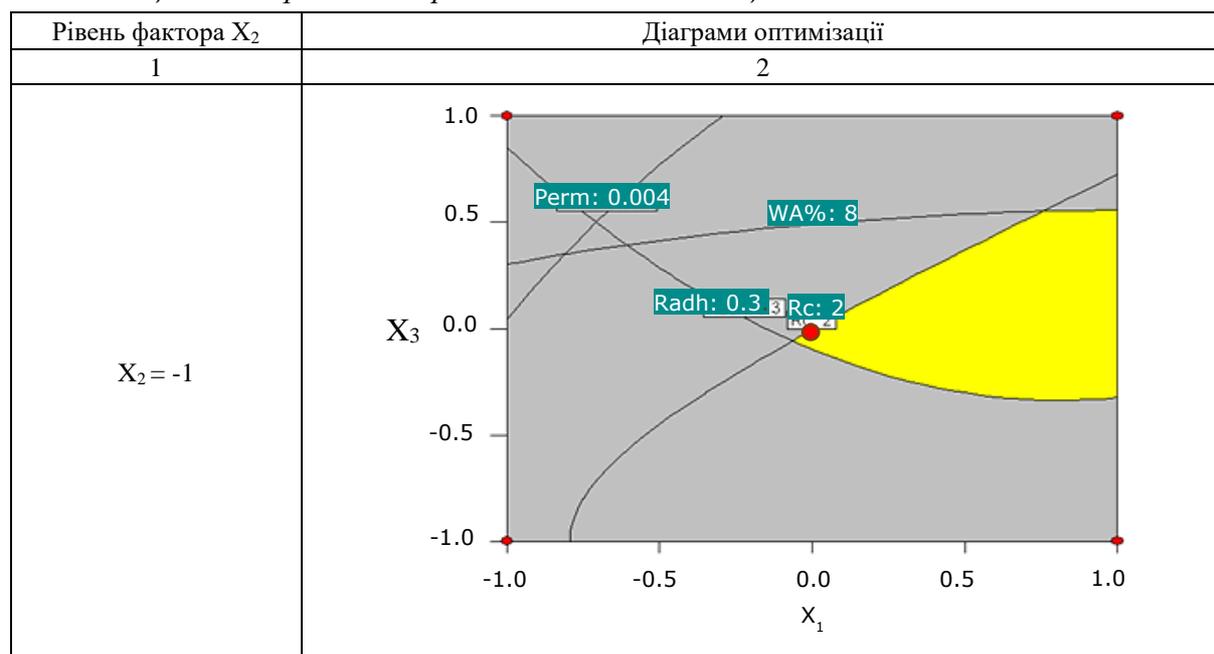
Таблиця 2 – Інтервали допустимості експлуатаційних характеристик складів

Властивість	Скорочення	Одиниці вимірювання	Мінімальний рівень	Максимальний рівень
1	2	3	4	5
Адгезійна міцність	Radh	МПа	0,3	0,5
Паропроникність	Perm	мг/(м·год·Па)	0,001	0,004
Міцність при стисненні	Rc	МПа	2	3,5
Рівень водонасичення	WA%	%	2	8

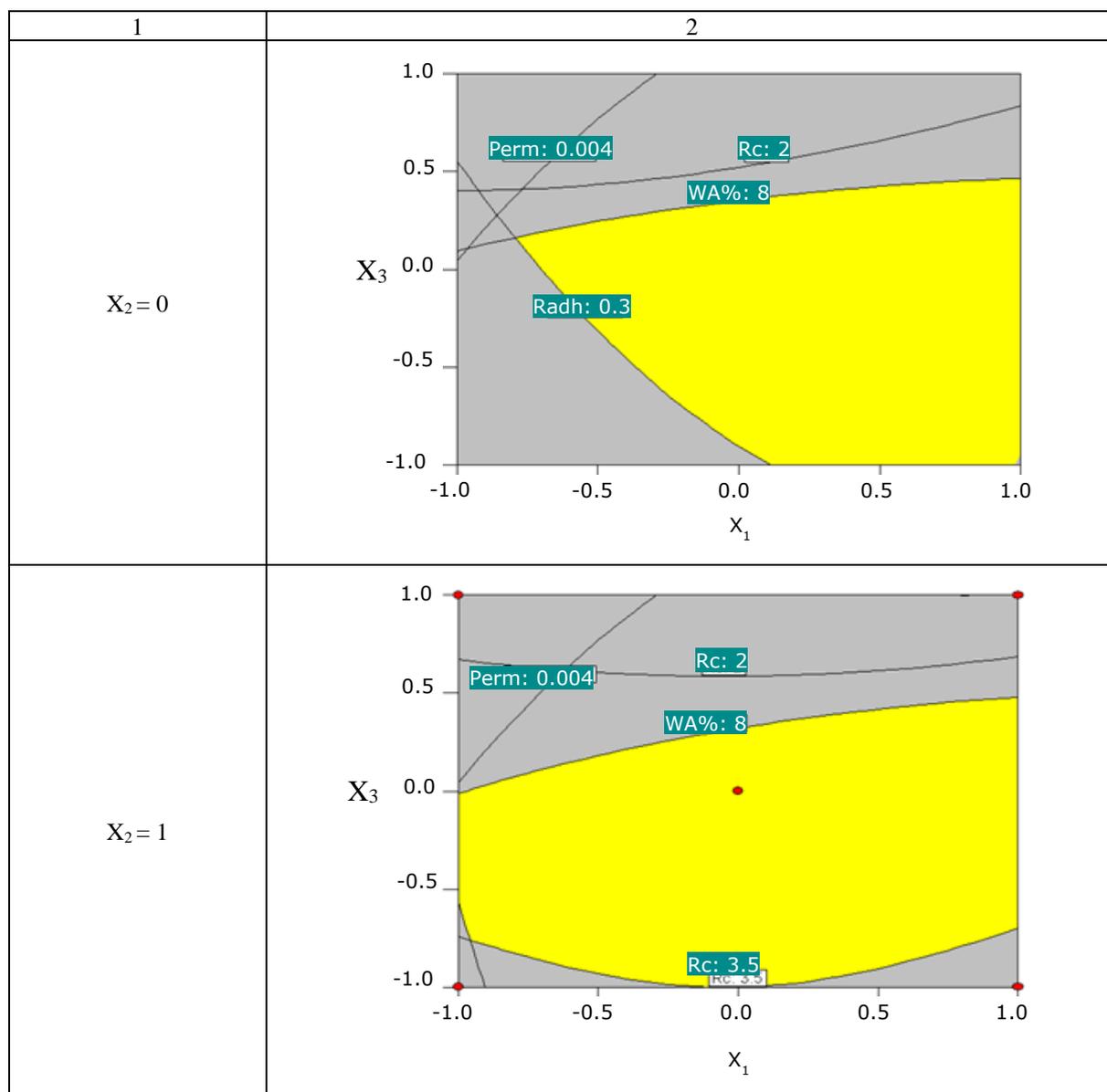
Джерело: розроблено авторами

При якісній оптимізації отримано оверлейні діаграми, які систематизовані в табл. 3.

Таблиця 3 – Оверлейні діаграми якісної оптимізації



Закінчення табл. 3



Джерело: розроблено авторами.

З оверлейних діаграм видно, що у всьому діапазоні змін чинника X_2 , тобто. за будь-якого вмісту глини, присутня криволінійна область складної форми. При $X_2 = -1$ кривими, що обмежують, є мінімуми R_{adh} і R_c і максимум $WA\%$, при $X_2 = 0$ такими кривими є максимум $WA\%$, і мінімуми R_{adh} , а при $X_2 = -1$ обмеженнями є максимум $WA\%$ і максимум R_c .

Після виділення областей допустимих складів було здійснено перехід до кількісної, багатокритеріальної оптимізації методом функції бажаності, заснованої на перетворенні кожного відгуку Y_i в часткову безрозмірну бажаність. У класичному формулюванні, що застосовується у програмному пакеті Design-Expert [17], бажаність кожної властивості визначається залежно від мети: максимізації, мінімізації, досягнення цільового значення або потраплення в заданий інтервал. Так, з метою «максимізувати» використовується функція, що має вигляд (1):

$$d(y) = \begin{cases} 0, & y \leq L \\ \left(\frac{y-L}{T-L}\right)^s, & L < y < T \\ 1, & y \geq T \end{cases} \quad (1)$$

де L – нижня межа;

T – бажане цільове значення, а параметр $s > 0$ відіграє роль ваги, що задає кривизну функції: при $s > 1$ функція стає більш "суворою", різкіше штрафує відхилення від мети; при $s < 1$ – більш "м'який".

Після визначення часткової бажаності виконується їхня агрегація в загальну бажаність (D), яка є критерієм оптимальності. У класичному вигляді загальна бажаність є зваженим геометричним середнім (2):

$$D = \left(\prod_{i=1}^n d_i^{w_i}\right)^{\frac{1}{\sum w_i}}, \quad (2)$$

де w_i – коефіцієнти, пропорційні важливості i-го відгуку, що визначається користувачем. Важливість (importance) являє собою параметр від 1 до 5, що відображає відносний внесок відгуку в загальну оптимізацію. Відгуки, що є критично важливими для функціональної довговічності, отримують високу важливість, що збільшує їх внесок при формуванні D. Далі оптимізація зводиться до максимізації (D) і рішення, що має найбільше значення загальної функції бажаності, вважається оптимальним у багатокритеріальному сенсі.

У задачі підбору складів реставраційних композитів для будівель з вапняку-черепашнику застосування функції бажаності особливо зручно, оскільки властивості матеріалів перебувають у конфліктних відношеннях: подрібнений черепашник збільшує адгезію та паропроникність, але одночасно різко підвищує водонасичення та знижує міцність на стиск; цемент підвищує міцність та знижує водонасичення, але зменшує паропроникність; глина підвищує адгезію та покращує реологію, але може збільшувати водопоглинання. У таких умовах немає єдиного критерію, і застосування функції бажаності дозволяє вибрати компромісне рішення, що відповідає конкретній «спеціалізації» складу.

Існує кілька тематичних варіантів оптимізації, кожен з яких відповідає певній ролі композиційного матеріалу в системі реставрації. В роботі при розробці максимально «дихаючого» складу (складу А) основною метою було досягнення низького водонасичення та високої паропроникності. Тому для цих властивостей функція бажаності була задана як мінімізація для водонасичення і максимізація для паропроникності, причому ваги обирались строго вище одиниці ($s = 2$), а важливість встановлена максимальною (5). Адгезію до черепашнику задали як параметр, що прагне максимуму, але з дещо меншою вагою, щоб уникнути надмірної концентрації рішення у вузьких областях факторного простору. Міцність у цьому варіанті була задана у вигляді інтервалу «не нижче за деякий мінімум», щоб шар залишався структурно стійким, але не втрачав паропроникності.

Таким чином, для визначення складу А були використані вимоги, обмеження, важливості та ваги, що наведені в табл. 4.

Таблиця 4 – Вимоги та обмеження для складу А

Фактори та властивості	Мета оптимізації	Нижня межа	Верхня межа	Нижня вага	Верхня вага	Важливість
X ₁	В інтервалі	-1	1	1	1	3
X ₂	В інтервалі	-1	1	1	1	3
X ₃	В інтервалі	-1	1	1	1	3
Rc	В інтервалі	2,7	3,5	1	1	3
Perm	максимум	0,001131	0,006168	1	1	5
Radh	максимум	0,3	0,5	1	1	4
WA%	мінімум	3,4	12,7	1	2	5

Джерело: розроблено авторами.

Результати оптимізації спеціалізованого «дихаючого» складу представлено в табл. 5 (перші 3 оптимальні варіанти).

Таблиця 5 – Оптимальний «дихаючий» консерваційний склад і його властивості

№	X ₁	X ₂	X ₃	Rc	Perm	Radh	WA%	Desirability
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1	1	-0,1	3,007	0,002	0,461	5,755	0,369
2	1	1	-0,11	3,021	0,002	0,460	5,715	0,369
3	1	1	-0,05	2,958	0,002	0,462	5,907	0,369

Джерело: розроблено авторами.

Оптимальний склад (склад А) реставраційного композиту, що «дихає», та значення для його основних властивостей показані на рис. 6.

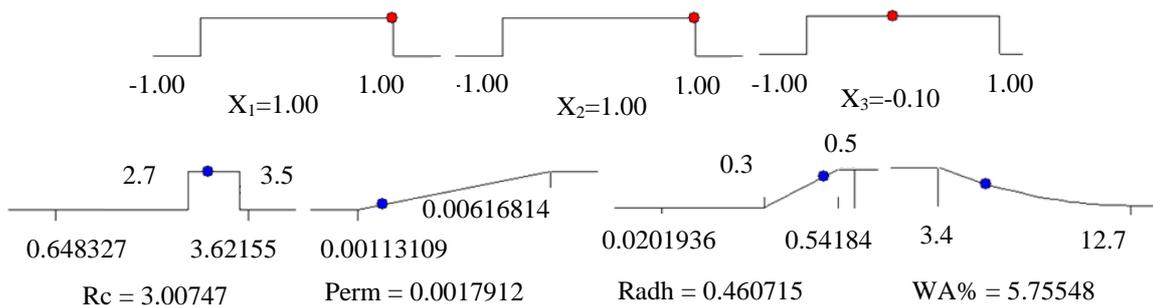


Рис. 6. Відображення складу А композиту та його властивостей

Джерело: розроблено авторами.

Низький рівень значень функції бажаності свідчить про суттєву різноспрямованість вимог.

Для стін з підвищеною вологістю ключовою метою стає мінімізація водонасичення при одночасному забезпеченні високої паропроникності, щоб прискорити віддачу води. Для цих критеріїв ваги часткових бажаностей встановлювали високими з максимальними значеннями. Адгезія регулювалась як максимальна величина з помірною вагою для забезпечення якісного контакту, але без обмеження оптимізації. Міцність на стиск задавалась без прагнення до максимальних значень, які можуть погіршити вологообмін.

Вимоги для оптимального складу Б композиту, призначеного для стін з підвищеною вологістю наведені в таблиці 6.

Таблиця 6 – Вимоги до складів для стін з підвищеною вологістю

Фактори та властивості	Мета оптимізації	Нижня межа	Верхня межа	Нижня вага	Верхня вага	Важливість
X ₁	В інтервалі	-1	1	1	1	3
X ₂	В інтервалі	-1	1	1	1	3
X ₃	В інтервалі	-1	1	1	1	3
Rc	В інтервалі	3	3,62155	1	1	3
Perm	максимум	0,00113	0,00617	1,2	1	5
Radh	максимум	0,3	0,5	1	1	4
WA%	мінімум	3,4	12,7	1	2,5	5

Джерело: розроблено авторами.

Результати оптимізації штукатурно-реставраційного складів для вологих стін (склад Б) показані в табл. 7 (три найкращі склади).

Таблиця 7 – Оптимальні штукатурні та реставраційні суміші для вологих стін

№	X ₁	X ₂	X ₃	Rc	Perm	Radh	WA%	Desirability
1	1	1	-0,93	3,622	0,002	0,432	4,062	0,313
2	1	1	-0,88	3,597	0,002	0,434	4,113	0,311
3	-0,45	1	-0,22	3,000	0,002	0,387	6,589	0,306

Джерело: розроблено авторами.

Отримані результати оптимізації (1 найкращий склад) відображені графічно на рис. 7.

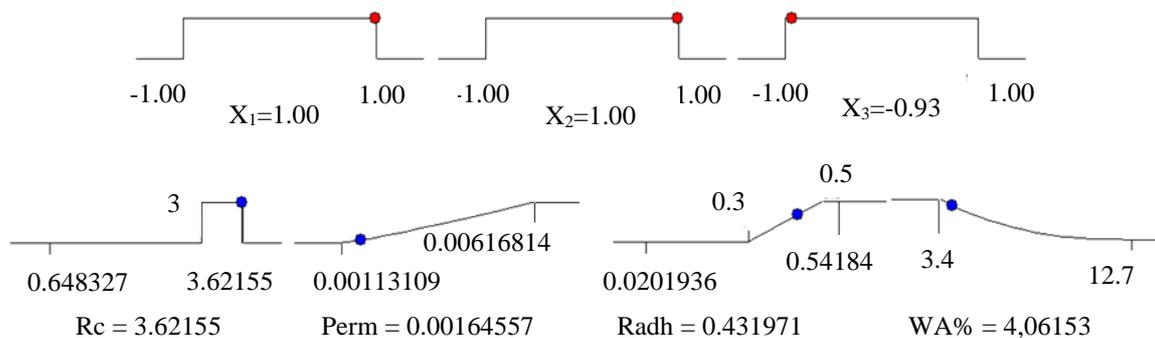


Рис. 7. Оптимальний штукатурно-реставраційний склад (склад Б) композиту для вологих стін

Джерело: розроблено авторами.

Значення функції бажаності суттєво менше за 1, що свідчить про різноспрямованість та конфлікт вимог до складу.

Висновки. Аналіз проведених досліджень показав, що ефективність реставраційних композитів для будівель з вапняку-черепашнику визначається насамперед ступенем їх структурної та гідрофізичної сумісності з пористою карбонатною основою, а не максимальними значеннями окремих механічних характеристик.

Вапняк-черепашник має пористу багатомасштабну структуру, що вимагає необхідність створення перехідної контактної зони між матеріалом реставрації та основою. Ця зона повинна мати градієнт пористості, проникності та жорсткості, що забезпечує рівноважний вологообмін між композитом і каменем. Такий підхід суттєво знижує ризик концентрації напружень у процесі експлуатації реставрованої будівлі, забезпечуючи довговічність і стабільність реставрації. Отже, важливо не просто прагнути до максимальної міцності матеріалів, а створювати комплексне узгодження фізико-хімічних і механічних параметрів реставраційних композитів з природною структурою вапняку-черепашнику.

Експериментально-статистичні моделі типу «склад – властивість» показали наявність виражених нелінійних ефектів і взаємного антагонізму між адгезійними, дифузійними, гідрологічними та міцнісними характеристиками. Підвищення адгезії та паропроникності, необхідних для довговічної роботи в системі «черепашник – реставраційний шар», супроводжується зростанням водонасичення і зниженням міцності на стиск, тоді як надмірне ущільнення матриці за рахунок збільшення частки жорстких в'язучих призводить до блокування капілярної мережі та погіршення вологообміну. Це підтверджує, що оптимальні рецептури формуються в області компромісу між взаємно конкуруючими вимогами.

Використання подрібненого черепашнику як складової комбінованого наповнювача відіграє ключову роль у формуванні сумісної контактної зони між реставраційним композитом і пористою карбонатною основою. Завдяки мінералогічній спорідненості з основою, подрібнений черепашник сприяє підвищенню адгезії, тобто покращенню зчеплення матеріалів. Крім того, його присутність підтримує високу паропроникність

композиту, що зумовлено відкритою поровою структурою, яка забезпечує ефективний вологообмін. Водночас існують граничні концентрації подрібненого черепашнику в складі реставраційного композиту. Перевищення цих концентрацій призводить до надмірного водопоглинання, що негативно впливає на механічні характеристики матеріалу, зокрема, знижує його міцність і працездатність при експлуатації. Таким чином, дуже важливо точно дозувати цей компонент для забезпечення балансу між адгезією, паропроникністю та механічною стабільністю реставраційного матеріалу.

Роль цементної складової в реставраційних матеріалах полягає в забезпеченні необхідної ранньої міцності та структурної зв'язності композиту. Але важливо обмежувати її вміст, оскільки надлишок цементу підвищує жорсткість матеріалу та знижує його дифузійну здатність, що негативно позначається на реставрації пористих карбонатних порід, де важлива паропроникність і здатність до вологообміну.

Глиниста домішка виступає як ефективний реологічний і структурний регулятор. Вона покращує проникнення матриці в пори основи та збільшує адгезійні властивості реставраційного шару. Проте, і для глинистої домішки існує оптимальний діапазон вмісту, при перевищенні якого зростає ступінь водонасичення композиту, що призводить до погіршення його міцнісних характеристик.

Застосування багатокритеріальної оптимізації методом функції бажаності у реставраційних композитах дозволило виділити технологічно відтворювані області складів із погодженими експлуатаційними характеристиками. Це дало змогу розробити спеціалізовані рецептури, адаптовані до різних умов експлуатації.

Список використаних джерел

1. Lubelli, B., Nijland, T.G., van Hees, R.P.J. (2021). Characterization and compatibility assessment of stone repair mortars. *Journal of Cultural Heritage*, 49, 174–182. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2021.02.001>.
2. Groot, C. (2016). Repair mortars for historic masonry: Effects of the binder choice on durability. *Heron*, 61(1), 33–56. <http://resolver.tudelft.nl/uid:41316542-1251-4c70-b970-65bff5a396a3>.
3. Alvarez-Galindo, J.I., Veiga, R., Martínez-Ramírez, S., Secco, M., Faria, P., Marvelaki-Papayianni, P., et al. (2021). RILEM TC 277-LHS: A review on mechanisms of setting and hardening of lime-based binding systems. *Materials and Structures*, 54, 1–30. <https://doi.org/10.1617/s11527-021-01648-3>.
4. Wang, X., Shang, H., Zhou, J., Gu, L., Xiao, Z., Wang, X., et al. (2024). Enhancing Hydraulic Lime Mortar with Metakaolin: A Study on Improving Restoration Materials for Historic Buildings. *Materials*, 17, 3548. <https://doi.org/10.3390/ma17143548>.
5. Naga Sai, A.; Ramadoss, R. (2021). A review on role of additives & pozzolanic materials in ancient structures. *Mater. Today Proc*, 43, 1383–1388. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.173>.
6. Žižlavský, T., Vyšvářil, M., Bayer P. (2023) Fine Pumice as Pozzolanic Additive in Restoration Lime Mortars. *RILEM Bookseries*, 42, 426–435. https://doi.org/10.1007/978-3-031-31472-8_34.
7. Strandberg-de Bruijn, P., Balksten K. (2024). Material properties of building limes for pointing mortar for renovation and restoration of neo-Gothic churches in Sweden. *MATEC Web of Conferences*, 403(3), 02010. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202440302010>.
8. Branco, F.G., Belgas, M.d.L., Mendes, C., Pereira, L., Ortega, J.M. (2021). Characterization of Fresh and Durability Properties of Different Lime Mortars for Being Used as Masonry Coatings in the Restoration of Ancient Constructions. *Sustainability*, 13, 4909. <https://doi.org/10.3390/su13094909>
9. Chen, Z., Liu, H., Xu, L., Ge, W. (2024). A review of mechanical properties and carbonation behavior evolution of lime mortar for architectural heritages restoration. *Miner. Miner. Mater*, 3, 3. <https://doi.org/10.20517/mmm.2023.26>.
10. Fusade, L., Orr, S.A., Wood, C., O'Dowd, M., Viles, H. (2019). Drying response of lime-mortar joints in granite masonry after an intense rainfall and after repointing. *Heritage Science*, 7, 38 <https://doi.org/10.1186/s40494-019-0277-7>.

11. Zhang, Y., Zhang, Y., Huang, J. (2022). Experimental study on capillary water absorption of sandstones from different grotto heritage sites in China. *Heritage Science*, 10, 25 <https://doi.org/10.1186/s40494-022-00656-y>.
12. Yue W, Wang B. (2024). Ceramic-added lime and cement mortars: A review of applications in building products. *Science Progress*, 107(3), 28. <https://doi.org/10.1177/00368504241266559>.
13. Silva, Bruna A., Guerreiro, E., Duarte, António P.C. (2025). Comparative study of lime-based mortars for conservation and restoration interventions. *Construction and Building Materials*, 499, 143956 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.143956>.
14. Ляшенко Т. В. (2021). Структуровані системи факторів і експериментально-статистичні моделі при дослідженні будівельних композитів. *Механіка та математичні методи*, 3(1), 47–61. <https://doi.org/10.31650/2618-0650-2021-3-1-47-61>.
15. Voznesensky, V., Lyashenko, T. (1998). Experimental statistical modelling in computational materials science. In: *Proceeding of the 37th International Seminar Modeling and Optimisations composites*. Odessa, April.
16. Voznesensky, V.A., Lyashenko, T.V., Ogarkov, B.L. (1989) Numerical Methods for Solving Construction and Technological Problems on a Computer. *Publishing House "Vyshcha School"*: Kyiv, Ukraine, 328 p.
17. Design of Experiments (DOE) Made Easy. (n.d.). <https://www.statease.com/software/design-expert/>.

References

1. Lubelli, B., Nijland, T.G., van Hees, R.P.J. (2021). Characterization and compatibility assessment of stone repair mortars. *Journal of Cultural Heritage*, 49, 174–182. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2021.02.001>.
2. Groot, C. (2016). Repair mortars for historic masonry: Effects of the binder choice on durability. *Heron*, 61(1), 33–56. <http://resolver.tudelft.nl/uuid:41316542-1251-4c70-b970-65bff5a396a3>.
3. Alvarez-Galindo, J.I., Veiga, R., Martínez-Ramírez, S., Secco, M., Faria, P., Maravelaki-Papayianni, P., et al. (2021). RILEM TC 277-LHS: A review on mechanisms of setting and hardening of lime-based binding systems. *Materials and Structures*, 54, 1–30. <https://doi.org/10.1617/s11527-021-01648-3>.
4. Wang, X., Shang, H., Zhou, J., Gu, L., Xiao, Z., Wang, X., et al. (2024). Enhancing Hydraulic Lime Mortar with Metakaolin: A Study on Improving Restoration Materials for Historic Buildings. *Materials*, 17, 3548. <https://doi.org/10.3390/ma17143548>.
5. Naga Sai, A.; Ramadoss, R. (2021). A review on role of additives & pozzolanic materials in ancient structures. *Mater. Today Proc*, 43, 1383–1388. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.173>.
6. Žižlavský, T., Vyšvářil, M., Bayer P. (2023) Fine Pumice as Pozzolanic Additive in Restoration Lime Mortars. *RILEM Bookseries*, 42, 426–435. https://doi.org/10.1007/978-3-031-31472-8_34.
7. Strandberg-de Bruijn, P., Balksten K. (2024). Material properties of building limes for pointing mortar for renovation and restoration of neo-Gothic churches in Sweden. *MATEC Web of Conferences*, 403(3), 02010. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202440302010>.
8. Branco, F.G., Belgas, M.d.L., Mendes, C., Pereira, L., Ortega, J.M. (2021). Characterization of Fresh and Durability Properties of Different Lime Mortars for Being Used as Masonry Coatings in the Restoration of Ancient Constructions. *Sustainability*, 13, 4909. <https://doi.org/10.3390/su13094909>
9. Chen, Z., Liu, H., Xu, L., Ge, W. (2024). A review of mechanical properties and carbonation behavior evolution of lime mortar for architectural heritages restoration. *Miner. Mater.*, 3, 3. <https://doi.org/10.20517/mmm.2023.26>.
10. Fusade, L., Orr, S.A., Wood, C., O'Dowd, M., Viles, H. (2019). Drying response of lime-mortar joints in granite masonry after an intense rainfall and after repointing. *Heritage Science*, 7, 38 <https://doi.org/10.1186/s40494-019-0277-7>.
11. Zhang, Y., Zhang, Y., Huang, J. (2022). Experimental study on capillary water absorption of sandstones from different grotto heritage sites in China. *Heritage Science*, 10, 25 <https://doi.org/10.1186/s40494-022-00656-y>.
12. Yue W, Wang B. (2024). Ceramic-added lime and cement mortars: A review of applications in building products. *Science Progress*, 107(3), 28. <https://doi.org/10.1177/00368504241266559>.

13. Silva, Bruna A., Guerreiro, E., Duarte, António P.C. (2025). Comparative study of lime-based mortars for conservation and restoration interventions. *Construction and Building Materials*, 499, 143956 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.143956>.

14. Liashenko, T. V. (2021). Strukturovani systemy faktoriv i eksperymentalno-statystychni modeli pry doslidzhenni budivelnykh kompozytiv [Structured factor systems and experimental-statistical models in the study of building composites]. *Mekhanika ta matematychni metody – Mechanics and mathematical methods*, 3(1), 47–61. <https://doi.org/10.31650/2618-0650-2021-3-1-47-61>.

15. Voznesensky, V., Lyashenko, T. (1998). Experimental statistical modelling in computational materials science. In: *Proceeding of the 37th International Seminar Modeling and Optimisations composites*. Odessa, April.

16. Voznesensky, V.A., Lyashenko, T.V., Ogarkov, B.L. (1989) Numerical Methods for Solving Construction and Technological Problems on a Computer. *Publishing House “Vyshcha School”*: Kyiv, Ukraine, 328 p.

17. Design of Experiments (DOE) Made Easy. (n.d.). <https://www.statease.com/software/design-expert/>.

Дата першого надходження статті до видання: 24.11.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 07.12.2025

UDC 691.55:519.233

Andrii Kolesnykov¹; Dmytro Levytskyi²

¹Doctor in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Chemistry and Ecology
Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture (Odessa, Ukraine)

E-mail: kolesnikov_himek@odaba.edu.ua. ORCID <https://orcid.org/0000-0001-8737-0933>

ResearcherID: [IRZ-3809-2023](https://orcid.org/IRZ-3809-2023)

²postgraduate student of the Department of Chemistry and Ecology
Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture (Odessa, Ukraine)
E-mail: 9241dv@odaba.edu.ua. ORCID <https://orcid.org/0000-0001-5350-522X>

RESEARCH AND OPTIMIZATION OF THE COMPOSITION OF RESTORATION COMPOSITES FOR SHELL LIMESTONE BUILDINGS

The paper presents the results of a comprehensive experimental and analytical study aimed at the development and optimization of plastering and restoration composites intended for the repair and conservation of buildings constructed from shell limestone. The relevance of the research is due to the pronounced porosity, multi-scale capillary structure, and moisture sensitivity of this natural carbonate stone, which makes it particularly vulnerable to incompatibility effects when dense cement-based or polymer repair materials are applied. This incompatibility often leads to moisture accumulation, salt crystallization, stress concentration at the interface, and subsequent degradation of the stone or the repair layer.

The study focuses on a multi-phase system “shell limestone substrate – interfacial zone – restoration composite,” in which the restoration material is based on air lime modified with moderate amounts of Portland cement and clay, and incorporates a combined aggregate consisting of quartz sand and crushed shell limestone. This formulation concept is intended to ensure mineralogical and structural compatibility with the porous carbonate substrate while simultaneously providing sufficient mechanical stability and controlled moisture transport.

Based on the experimental data, second-order regression models of the “composition–property” type were developed. The resulting response surfaces and isosurfaces revealed pronounced nonlinear effects and antagonistic interactions between the components. It was shown that adhesion, moisture transport properties, and mechanical strength are governed by competing mechanisms: densification of the mineral matrix increases strength but reduces vapor permeability, whereas the introduction of porous carbonate aggregate enhances moisture transport and interfacial compatibility at the expense of compressive strength. Clay plays a dual role by improving rheological properties and interfacial adaptation while, under certain conditions, increasing capillary activity.

To resolve these inherent contradictions, a multi-criteria optimization procedure based on the desirability function approach was applied. This method made it possible to identify compromise formulations tailored to different restoration scenarios, including “breathable” conservation layers and plasters for walls exposed to elevated moisture levels. The optimized compositions exhibit balanced adhesion, sufficient vapor permeability, controlled water uptake, and adequate mechanical performance, ensuring long-term compatibility with shell limestone substrates.

Keywords: Shell limestone, restoration composites, adhesion, vapor permeability, water saturation, experimental–statistical modeling, multi-criteria optimization.

Fig.: 7. Table: 7. References: 17.